

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.06.014

基于正交试验的医用微球囊拉伸吹塑优化设计

代光辉,张晴晴,靳国宝

(巢湖学院机械工程学院,安徽巢湖 238000)

摘要:为提高医用微球囊壁厚均匀性以及成型稳定性,以成型温度、成型压力、拉伸距离和保温时间四个拉伸吹塑工艺参数为优化对象,在完成田口正交试验与极值分析的基础上,进一步择优缩小各因素的水平范围,设计并实施了具有因素交互作用的正交试验。交互试验结果表明,成型温度和成型压力的交互作用及成型温度和拉伸距离的交互作用对球囊壁厚均匀性影响明显。依据两次正交试验获得的优化参数进行成型实验与测量统计,对比发现,交互正交试验优化结果下的球囊壁厚均匀性平均值略高于田口正交实验优化结果,达到96.03%,两者之间的差值为0.17%;但是两组参数下球囊壁厚均匀性的方差相差较大,前者相较于后者降低了10.58%,表明交互正交试验优化结果提高了球囊成型的稳定性。

关键词: 医用微球囊;拉伸吹塑;工艺优化;正交试验;交互作用

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)06-0078-06

Optimization Design of Stretch Blow Molding Process of Medical Microballoon based on Orthogonal Test

Dai Guanghui, Zhang Qingqing, Jin Guobao

(College of Mechanical Engineering, Chaohu University, Chaohu 238000, China)

Abstract : An orthogonal experiment with factor interaction was designed and implemented with the level range of each factor was further narrowed based on the completion of Taguchi orthogonal test and extreme value analysis, taking the four stretch blow molding process parameters of molding temperature, molding pressure, stretching distance, and holding time as optimization objects to improve the uniformity of wall thickness and molding stability of medical microballoons. The interactive test results show that the interaction of molding temperature and molding pressure, as well as molding temperature and stretching distance, have obvious effects on the wall thickness uniformity of the balloon. The molding experiments and measurement statistics were performed based on the optimized parameters obtained from these two orthogonal tests. It can be found from the comparison that the average value of the balloon wall thickness uniformity under the optimization results of the interactive orthogonal experiment is 96.03%, which is slightly higher than that of the Taguchi orthogonal experiment, and the difference between these two experiments is 0.17%; however, the variance of the balloon wall thickness uniformity under the former test is reduced by 10.58% compared with the latter, which shows the great difference between these two tests and indicates that the optimization results of the interactive orthogonal experiment improve the ball stability of ball molding.

Keywords : medical microballoon ; stretch blow molding ; process optimization ; orthogonal experiment ; interaction

近年来,介入手术以其安全可靠、损伤小、疗程短、见效快、对人体组织器官无形态破坏等优点而广泛应用于众多医疗领域。医用微球囊作为介入医疗的核心器械,在治疗血管狭窄、扩张血管和塑形、药物支架的输送与扩张、椎体复位等领域发挥着极其

重要的作用。目前,我国微球囊制品受生产设备和配套工艺技术的影响,研制相对滞后,大部分产品还只能依赖进口,严重限制了我国在介入医疗领域的研究和应用。

众所周知,在聚合物成型过程中,工艺优化研

基金项目: 安徽省高校自然科学研究重大项目(KJ2018ZD045),巢湖学院科学研究重点项目(XLZ-202001),巢湖学院重点实验室项目(kj20zsys03)

通信作者: 代光辉,讲师,主要研究方向为微聚合物精密成型

收稿日期: 2021-03-11

引用格式: 代光辉,张晴晴,靳国宝. 基于正交试验的医用微球囊拉伸吹塑优化设计[J]. 工程塑料应用,2021,49(6): 78-83.

Dai Guanghui, Zhang Qingqing, Jin Guobao. Optimization design of stretch blow molding process of medical microballoon based on orthogonal test[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(6): 78-83.

究一直是学者们关注的重点,同时也是一项极具挑战性的工作,医用微球囊拉伸吹塑成型也不例外。国内外一些学者从不同角度、用不同方法对微球囊拉伸吹塑成型工艺进行了研究,取得了一定进展,这些研究主要集中在基于数值模拟的仿真研究和基于实验的成型因素研究两方面。在数值模拟方面^[1-4],由于聚合物微球囊拉伸吹塑流动过程中精准控制进入微米量级,微拉伸吹塑流动过程涉及到微拉伸流动、微传热学、微机械结构及材料等相关技术领域的研究还不够成熟,医用微球囊的微拉伸流变行为难以准确描述,限制了微球囊微拉伸吹塑的理论分析、模拟优化。在微球囊成型实验方面^[5-10],成型温度、吹胀压力、拉伸率和保压时间四个因素被广泛研究,每个因素对医用微球囊的质量指标影响各异,都反映出一定的规律性,但是拉伸吹塑工艺对医用微球囊成型过程的耦合作用却难以表象,鲜有研究。

笔者将立足于实验,采用田口正交试验法设计初步实验方案,通过极值分析获取微球囊拉伸吹塑成型中成型温度、成型压力、拉伸距离和保温时间四个主要工艺参数的优化组合,并且进一步缩小各因素的水平范围,设计具有因素交互作用的正交试验方案,获取新的实验参数组合,最后对比分析两组优化工艺参数组合下的球囊试制结果。

1 成型实验

1.1 球囊制样

所研究的医用微球囊是一种顺应性球囊,其体积能够膨胀到其原始大小的几倍,并且在压力降低后能够恢复到其原始形状和大小,结构与尺寸见图1,主要由主体(体部)、两个锥体(锥部)和两个颈部组成。其中,主体是球囊的光滑圆柱部分,在手术过程中,通过该部分的膨胀来恢复由于压缩骨折而失去的椎骨高度;颈部是球囊的末端,用于与导管连接;圆锥体是气球在身体和颈部之间的过渡部分。

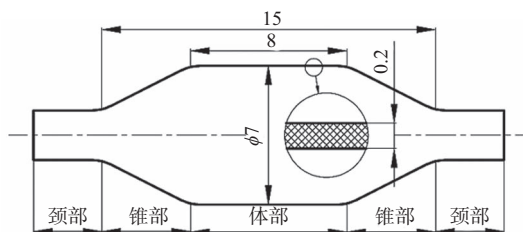


图1 医用球囊的结构示意图

1.2 球囊试制

球囊制造过程通常包括挤出成型、两端拉伸和

拉伸吹塑三个主要阶段^[11]。挤出成型主要是为了获得球囊拉伸吹塑所需的坯管。实验所需坯管为内径3.5 mm和外径4.3 mm的高同心度、高壁厚均匀性的微管。接着,坯管被放置在球囊拉伸机上进行制囊坯,即在高温下拉伸坯管的两端,留下中间未加热伸长的部位。然后,在球囊成型机上进行拉伸吹塑成球囊制品。

球囊拉伸吹塑过程是将具有囊坯的微管一端放置在与压缩氮气相连的装置上,另一端穿过模具中心并固定到用于拉升的装置上。首先,囊坯轴向两端在低压下进行预拉伸,同时囊坯在模具内加热并保持一段时间;然后,在囊坯型腔内部通入高压气体,迫使其立刻在模具内膨胀,形成气泡,并将气泡沿轴向拉升延展至球囊;最后,将模具冷却并释放压力就可取出球囊。上述所用的球囊拉伸机和球囊成型机均为常州常美医疗技术有限公司生产的CMBPL-01系列设备,球囊制作流程如图2所示。

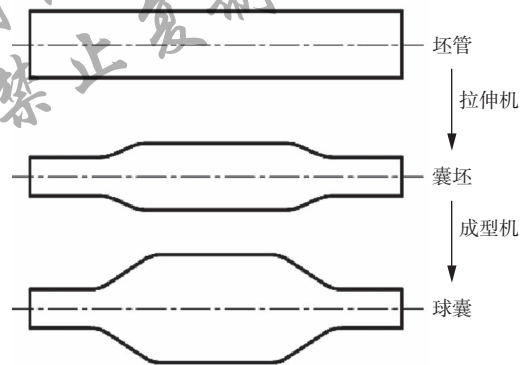


图2 球囊成型流程图

1.3 材料

用于试制图1后凸成形术球囊样本所用的材料为热塑性聚氨酯(TPU),为德国拜耳公司生产的牌号为RxT90A的产品,它是一种芳香族聚醚基热塑性聚氨酯,适合注模成型、挤出成型和拉伸吹塑加工。该材料的熔点为199℃,维卡软化温度为106℃。

1.4 制品标定

实验主要以球囊壁厚均匀性为评价指标。壁厚均匀性记为 G ,是通过在每个样本轴向上标记7个位置(如图3所示),测量相应的壁厚值记为 δ_i ($i=0,1,\dots,6$),然后依照公式(1)计算所得^[12]。

$$G = 100\% - \frac{S_{\text{d}}}{\delta} \times 100\% \quad (1)$$

其中, S_{d} 是壁厚的标准偏差, δ 是壁厚的平均

值, S_{td} 和 δ 根据以下公式计算而得。

$$S_{td} = \left[\sum_{i=1}^n \frac{(\delta_i - \bar{\delta})^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$\bar{\delta} = \frac{1}{n}(\delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_n) \quad (3)$$

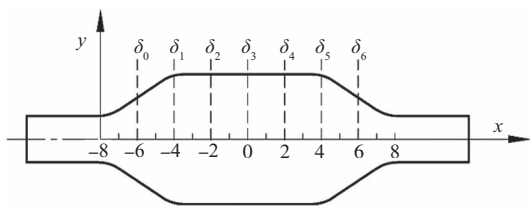


图3 球囊标定示意图

2 田口正交试验

2.1 实验设计

从已有研究可知,成型压力 (P)、成型温度 (Q)、保温时间 (T) 和拉伸距离 (D) 是影响拉伸流动特性的主要因素,也是拉伸吹塑成型的四个重要工艺参数。选择上述四个参数作为测试因素,根据初步测试结果,确定参数范围如下:成型压力取 4~7 atm,成型温度取 140~170℃,保温时间取 20~50 s,拉伸距离 8~14 mm。将每个因素设置为四个不同的水平,见表 1。在测试中,其它拉伸吹塑参数为型坯长度 10 mm,冷却水温度 23℃,冷却时间 90 s,预拉伸力 80 g,初始压力 2 atm。

表1 田口正交试验因素水平

水平	因素			
	P/atm	$Q/^\circ\text{C}$	T/s	D/mm
1	4	140	20	8
2	5	150	30	10
3	6	160	40	12
4	7	170	50	14

选择 $L_{16}(4^4)$ 田口正交表^[13]设计了表 2 的试验方案,进行后凸成形术医用微球囊实验试制,对球囊壁厚均匀性进行标定与统计,结果同样记录在表 2 中。

为获得医用微球囊拉伸吹塑成型优化工艺参数,采用极差分析法判断实验因素对球囊壁厚均匀性影响的主次顺序,根据表 2 中的数据,计算出每个因子的平均值 k_i ,以及各因素的极差 R 。其中,极差 R 值越大,表明该因素对实验指标值影响越大^[14]。极差分析计算结果见表 3,因素均值指标见图 4。

从表 3 可以清楚地看出每个参数对壁厚均匀性的影响,其顺序是成型温度 (Q) > 成型压力 (P) > 拉伸距离 (D) > 保温时间 (T)。从图 4 可知,成型

表2 田口正交试验方案和试验结果

实验号	因素				壁厚均匀性/%
	P	Q	T	D	
1	1	1	1	1	80.95
2	1	2	2	2	87.22
3	1	3	3	3	89.47
4	1	4	4	4	83.51
5	2	1	2	3	83.76
6	2	2	1	4	88.18
7	2	3	4	1	93.74
8	2	4	3	2	93.67
9	3	1	3	4	85.69
10	3	2	4	3	92.58
11	3	3	1	2	95.26
12	3	4	2	1	93.27
13	4	1	4	2	85.51
14	4	2	3	1	90.27
15	4	3	2	4	92.13
16	4	4	1	3	90.23

表3 极差分析表

参数	因素				%
	P	Q	T	D	
k_1	85.29	83.99	88.66	89.83	
k_2	89.84	88.56	89.10	90.22	
k_3	91.70	92.65	89.78	89.11	
k_4	89.54	90.17	88.84	88.20	
R	6.41	8.67	1.12	3.03	

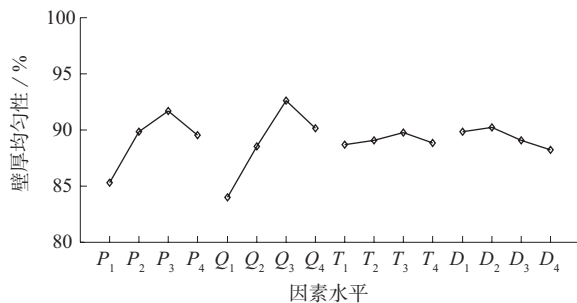


图4 因素均值指标

温度的最好水平为 Q_3 ,成型压力的最好水平为 P_3 ,拉伸距离的最好水平为 D_2 ,保温时间的最好水平为 T_3 ,即球囊壁厚均匀性最优参数组合为 $Q_3P_3D_2T_3$,称其为田口优化组,得到的四个因素的最佳成型方案为:成型温度 160℃,成型压力 6 atm,拉伸距离 10 mm,加热时间 40 s。

3 交互正交试验

3.1 实验设计

上述所设计的正交试验方案未考虑各因素之间的交互影响,但事实上各因素之间并非完全独立的。在许多实验中^[15-16],不仅单一因素对指标有影响,各因素之间的耦合也起到关键作用。为了进一步提高球囊的成型质量,从图 4 中选取各因素中水

平数较高的两个数值重新设计正交实验,因素水平表如表4所示。另外,从田口正交实验结果与极值分析中可知,成型温度、成型压力和拉伸距离三个因素对球囊壁厚均匀性影响较显著,因此,在新的正交实验中需考虑上述三个因素直角的交互作用影响,交互正交实验方案见表5。其中, $Q \times P$ 表示成型温度和成型压力交互作用, $Q \times D$ 表示成型温度和拉伸距离交互作用, $P \times D$ 表示成型压力和拉伸距离交互作用。按照所设计的实验方案进行球囊实验制造,测量并统计球囊壁厚均匀性,结果同样记录在表5中。极差分析计算结果记录在表6中。

表4 交互正交试验因素水平表

水平	因素			
	P/atm	$Q/^\circ\text{C}$	T/s	D/mm
1	5	160	30	8
2	6	170	40	10

表5 交互正交试验方案和试验结果

实验号	因素与交互因素							壁厚均匀性/%
	Q	P	$Q \times P$	D	$Q \times D$	$P \times D$	T	
1	1	1	1	1	1	1	1	94.56
2	1	1	1	2	2	2	2	94.82
3	1	2	2	1	1	2	2	95.68
4	1	2	2	2	2	1	1	95.61
5	2	1	2	1	2	1	2	96.03
6	2	1	2	2	1	2	1	95.36
7	2	2	1	1	2	2	1	93.27
8	2	2	1	2	1	1	2	92.59

表6 交互正交实验极差分析表

参数	因素与交互因素							%
	Q	P	$Q \times P$	D	$Q \times D$	$P \times D$	T	
k_1	95.17	95.19	93.81	94.89	94.55	94.70	94.70	
k_2	94.31	94.29	95.67	94.60	94.93	94.78	94.78	
R	0.86	0.90	1.86	0.29	0.38	0.08	0.08	

由表6中的极差 R 计算可知,各因素及其交互作用对球囊壁厚均匀性的影响次序是:成型温度和成型压力的交互作用($Q \times P$)>成型压力(P)>成型温度(Q)>成型温度和拉伸距离的交互作用($Q \times D$)>拉伸距离(D)>保温时间(T)、成型压力和拉伸距离的交互作用($P \times D$)。成型温度和成型压力的交互作用对指标的影响均大于温度和压力的单独作用。因此,不考虑交互作用影响的田口优化组中成型温度直接选取 Q_1 (160 $^\circ\text{C}$)以及成型压力直接选取 P_2 (6 atm)未必是最优的参数。在此引用二元素表,分别求出成型温度和成型压力在各因素水平下的不同搭配数据结果,再从中选取有利的参数搭配组合,方为最优参数。成型温度和成型压力的二元素分配表见表7。

表7 成型温度与成型压力二元素搭配表

因素	Q_1	Q_2
P_1	(94.56%+94.82%)/2=94.69%	(96.03%+95.36%)/2=95.70%
P_2	(95.68%+95.61%)/2=95.65%	(93.27%+92.59%)/2=92.93%

从表7可知, $Q_2 \times P_1$ 指标值大于 $Q_1 \times P_2$,这表明对于球囊壁厚均匀性而言,成型温度选取 Q_2 (170 $^\circ\text{C}$)配合成型压力选取 P_1 (5 atm)的参数组合要优于成型温度选取 Q_1 (160 $^\circ\text{C}$)配合成型压力选取 P_2 (6 atm)的参数组合。同样,成型温度和拉伸距离的交互作用对壁厚均匀性的影响大于拉伸距离的单独作用。引用二元素搭配表分析成型温度和拉伸距离的交互作用,二元素搭配表见表8。

表8 成型温度与拉伸距离二元素搭配表

因素	Q_1	Q_2
D_1	(94.56%+95.68%)/2=95.12%	(96.03%+93.27%)/2=94.65%
D_2	(94.82%+95.61%)/2=95.22%	(95.36%+92.59%)/2=93.98%

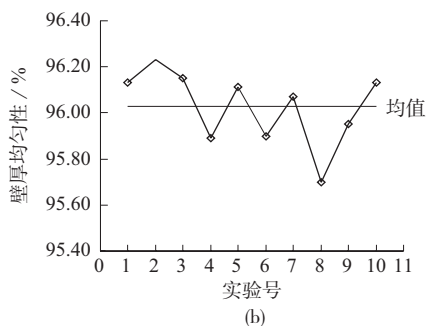
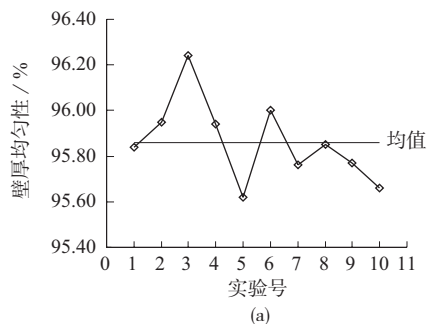
从表8可知, $Q_1 \times D_2$ 的指标值最大,略大于 $Q_1 \times D_1$ 指标值; $Q_2 \times D_1$ 指标值大于 $Q_2 \times D_2$,后两种参数组合方案均小于前两种。但考虑到成型温度和成型压力的交互影响对球囊壁厚均匀性的影响最大,其参数组合优先选取 Q_2 (170 $^\circ\text{C}$)和 P_1 (5 atm),则拉伸距离就仅能从 $Q_2 \times D_1$ 和 $Q_2 \times D_2$ 两种方案中选择,最终的参数组合方案为 $Q_2 \times D_1$,即拉伸距离选择 D_1 (8 mm)。另外保温时间选取 T_2 (40 s),忽略成型压力和拉伸距离的交互作用的影响。

综上所述,考虑因素之间交互作用的正交试验最优参数组合为 $Q_2 P_1 D_1 T_2$,称其为交互优化组,得到的四个因素的最佳成型方案为:成型温度170 $^\circ\text{C}$,成型压力5 atm,拉伸距离8 mm,保温时间40 s。

4 对比分析

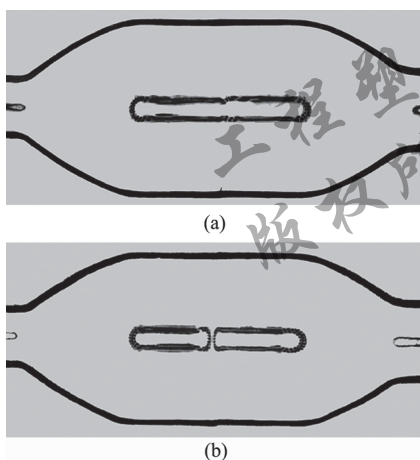
将田口优化组工艺参数和交互优化组工艺参数分别用于医用微球囊拉伸吹塑成型实验,成型样本数为10个。测量计算出每一个样本的壁厚均匀性。各球囊壁厚均匀性分布见图5。

对图5分布结果统计计算得知,在全部试制样本中壁厚均匀性最大值和最小值均出现在田口优化组,该组方案下的球囊壁厚均匀性平均值为95.86%,交互优化组方案下的球囊壁厚均匀性平均值为96.03%,两者之间的差值为0.17%,后者略有提高。但是两者壁厚均匀性的方差相差较大,交互优化组下的球囊壁厚均匀性的方差相较于田口优化组下降了10.58%,说明交互正交试验优化结果提高了球囊成型的稳定性。图6为田口优化组和交互优化组中一个样本球囊的截面图。



a—田口优化组; b—交互优化组

图5 试制样本壁厚均匀性分布



a—田口优化组样本; b—交互优化组样本

图6 球囊截面

5 结论

为提高医用微球囊成型壁厚均匀性以及各球囊壁厚稳定性,采用田口正交试验法设计并完成了16组实验,通过极差分析得知,各参数对壁厚均匀性的影响次顺为成型温度(Q)>成型压力(P)>拉伸距离(D)>保温时间(T)。得到了一组最佳成型方案 $Q_3P_3D_2T_3$,以及每因素中较大的两个水平。进一步设计了具有因素交互作用的正交试验方案,交互试验结果表明,成型温度和成型压力以及成型温度和拉伸距离的交互作用对球囊壁厚均匀性的影响明显。并获得了一组新的优化结果,具体参数为

成型温度取 170°C ,成型压力为 5 atm ,拉伸距离为 8 mm ,保温时间为 40 s 。将两组正交试验得到的优化参数组合进行球囊成型实验与测量统计,对比发现,交互优化组球囊壁厚均匀性平均值略高于田口优化组,达到 96.03% ,两者之间相差 0.17% ;但是两组球囊壁厚均匀性的方差相差较大,前者相较于后者降低了 10.58% ,说明交互正交试验优化结果提高了球囊成型的稳定性。

参考文献

- [1] Menary G H, Armstrong C G. Experimental study and numerical modeling of injection stretch blow molding of angioplasty balloons[J]. *Plastics, Rubber and Composites*, 2006, 35(8):348–354.
- [2] Mir H, Benrabah Z, Thibault F. The use of elastic-plastic material model coupled with pressure-volume thermodynamic relationship to simulate the stretch blow molding of polyethylene terephthalate[C]. *AIP Conference Proceedings*, Porto, Portugal, 2007:331–336.
- [3] 傅雪磊. 球囊成型工艺与过程数值模拟研究[D]. 北京:北京化工大学, 2017.
Fu Xuelei. Research on numerical simulation of balloon forming process and process[D]. Beijing:Beijing University of Chemical Technology, 2017.
- [4] Bian J Y, Jin G B, Qin P, et al. Influence of initial value of transient time step on numerical simulation of blow molding balloon[J]. *American Journal of Computational Mathematics*, 2020, (10):266–274.
- [5] 刘贤超. 微球囊成型机理与成型设备的研究[D]. 北京:北京化工大学, 2008.
Liu Xianchao. Research on the micro-balloon molding mechanism and molding equipment[D]. Beijing:Beijing University of Chemical Technology, 2008.
- [6] Lalli D. Cycle-to-cycle control of the angioplasty balloon fabrication process[D]. Montreal:McGill University, 2010.
- [7] Ro A J, Vipul D. Properties of nylon 12 balloons after thermal and liquid carbon dioxide treatments[J]. *Materials Science and Engineering C*, 2013, 33(2):909–915.
- [8] Salomeia Y M, Menary G H, Armstrong C G. Experimental investigation of stretch blow molding, part 2:Analysis of process variables, blowing kinematics, and bottle properties[J]. *Advances in Polymer Technology*, 2013, 32(S1):E436–E450.
- [9] 丁友江, 李超, 翟云飞. 骨科球囊成型技术工艺参数的正交试验

- 及优化[J]. 中国医疗器械信息, 2017, 23(13):22-23, 132.
- Ding Youjiang, Li Chao, Zhai Yunfei. Orthogonal experiment study and optimization on preparation of bone balloon[J]. China Medical Device Information, 2017, 23(13):22-23, 132.
- [10] Dai G H, Zhang Q Q, Jin G B. A model developed for predicting uniformity of kypho-plasty balloon wall thickness based on the orthogonal test[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2020(6):1-8.
- [11] Wei H, Yan S, Goel S. Characterization and modeling the mechanical behaviour of poly (l-lactic acid) for the manufacture of bioresorbable vascular scaffolds by stretch blow molding[J]. International Journal of Material Forming, 2020. doi:10.1007/s12289-018-01463-2.
- [12] 靳国宝, 王敏杰, 赵丹阳, 等. 聚合物双腔微管挤出成型工艺试验研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(24):19-27.
- Jin Guobao, Wang Minjie, Zhao Danyang, et al. Experimental investigation of extrusion process of double-lumen micro tube[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(24):19-27.
- [13] Madhavi S K, Hanuman N, Rao R. Regression model developed using RSM for predicting withstanding pressure of HDPE pipe during extrusion process[J]. Recent Advances in Material Sciences, 2019(8):177-185.
- [14] 舒海涛, 刘治华, 梁帅, 等. COC 微流控芯片收缩变形工艺参数优化[J]. 塑料, 2020, 49(6):133-136, 142.
- Shu Haitao, Liu Zhihua, Liang Shuai, et al. Optimization of shrinkage and deformation process parameters of COC micro fluidic chip[J]. Plastics, 2020, 49(6):133-136, 142.
- [15] 曾军亮, 王荣吉, 冯晓欣. 注射成型工艺参数对塑料制品翘曲变形的影响研究[J]. 工程塑料应用, 2013, 41(3):56-59.
- Zeng Junliang, Wang Rongji, Feng Xiaoxin. Effects of injection molding process parameters on warpage of plastic parts[J]. Engineering Plastics Application, 2013, 41(3):56-59.
- [16] 刘良先, 冯志华, 呼春雪, 等. 基于正交试验的 PET 瓶拉伸吹塑优化设计[J]. 中国塑料, 2020, 34(6):73-79.
- Liu Liangxian, Feng Zhihua, Hu Chunxue, et al. Optimization design of PET bottle stretch blow molding based on orthogonal test[J]. China Plastics, 2020, 34(6):73-79.
- (上接第 77 页)
- [8] Xu Baiping, Wang Meigui, He Liang, et al. Self-cleaning plasticizing venting and extruding apparatus by co-rotating non-twin multi-screws and method thereof:US 9174380[P]. 2015-11-03.
- [9] 徐百平, 王玫瑰, 喻慧文. 嵌入式矮螺棱同向非对称多螺杆挤出机及其加工方法: ZL201611127519.1[P]. 2019-05-07.
- Xu Baiping, Wang Meigui, Yu Huiwen. Embedded multi-screw extruder with low-edge codirectional asymmetry and its processing method: ZL201611127519.1[P]. 2019-05-07.
- [10] 徐百平, 王玫瑰, 何亮, 等. 头数渐变全程自洁的同向自洁双螺杆挤出机及其加工方法: ZL201510442207.9[P]. 2019-05-07.
- Xu Baiping, Wang Meigui, He Liang, et al. The same direction self-cleaning twin-screw extruder and a processing method: ZL201510442207.9[P]. 2019-05-07.
- [11] Yu H, Xu B, Liu B, et al. A conveying model of fluid partially filled in a nontwin screw extruder allowing for a positive displacement[J]. Polymer Engineering & Science, 2020, 60(1):151-160.
- [12] Xu B, Liu Y, He L, et al. Effect of centerline distance on mixing of a non-Newtonian fluid in a cavity with asymmetric rotors[J]. Physics of Fluids, 2019.10.1063/1.5049236.
- [13] Xu B, Liu Y, He L, et al. Numerical study of mixing dynamics inside the novel elements of a corotating nontwin screw extruder[J]. Advances in Polymer Technology, 2018, 37(7):2 478-2 496.
- [14] Yu H, Xu B, Wu H, et al. A visualization of flow patterns of viscoelastic fluid partially filled in a co-rotating nontwin screw extruder[J]. Polymer Engineering & Science, 2019, 59(S1):E24-E32.
- [15] 徐百平, 喻慧文, 杜遥雪. 一种同向多螺杆挤出机及其加工方法: ZL201910349687.2[P]. 2019-04-28.
- Xu Baiping, Yu Huiwen, Du Yaoyue. The utility model relates to a co-direction multi-screw extruder and a processing method: ZL201910349687.2[P]. 2019-04-28.
- [16] Yu H, Xu B, Wu H, et al. Breakup of a viscoelastic droplet in co-rotating non-twin screw channels[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020, 59:15 075-15 086.
- [17] Taylor G I. The viscosity a fluid containing small drops another fluid[J]. Proceedings of the Royal Society of London A, 1932, 138:41-48.
- [18] Taylor G I. The formation of emulsions in definable fields of flow[J]. Proceedings of the Royal Society of London A, 1934, 146:501-523.